

УДК 004.925:535.6

Олександр Мацулевич, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерної механіки
та комп'ютерне проектування,
Максим Супрун, асистент кафедри інженерної механіки
та комп'ютерне проектування,
Ілля Тетервак, асистент кафедри інженерної механіки
та комп'ютерне проектування,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

КОЛІРНІ РЕЖИМИ ТА МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

Анотація. Людське око здатне сприймати світлове випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 380 до 770 нм, розрізняючи при цьому приблизно 10 тисяч різних кольорів. Хвилі різної довжини око сприймає по-різному. Найбільш чутливим є сприйняття зеленого кольору, далі - червоного, а потім синього. Людина краще розрізняє кольори об'єктів, що знаходяться ближче, ніж тих, які розташовані на значній відстані. Крім того, колір дрібних об'єктів сприймається значно гірше. Здатність до розрізнення кольорів є індивідуальною особливістю людини [2]. На сприйняття кольору також впливає спосіб його відтворення: однакові зображення, відображені на різних пристроях, можуть виглядати по-різному. Проблема точного відтворення кольору є складною і досі не має повністю досконалого вирішення. Колір відіграє важливу роль у підсиленні візуального враження від зображення та збільшенні його інформаційної насиченості. Відчуття кольору формується мозком людини внаслідок аналізу світлового потоку, що потрапляє на сітківку ока від об'єктів, які випромінюють або відбивають світло.

Ключові слова: фізичні характеристики світлового потоку, потужність, яскравість, освітленість, монохроматичне випромінювання, глибина кольору, або колірна роздільна здатність.

Abstract. The human eye is capable of perceiving light radiation in the wavelength range from 380 to 770 nm, distinguishing approximately 10,000 different colors. The eye perceives waves of different lengths differently. The eye is most sensitive to green, followed by red, and then blue. People are better at distinguishing the colors of objects that are closer than those located at a considerable distance. In addition, the colors of small objects are perceived much less clearly. The ability to distinguish colors is an individual characteristic of a person. Color perception is also influenced by how it is reproduced: identical images displayed on different devices may look different. The problem of accurate color reproduction is complex and has yet to be fully solved. Color plays an important role in enhancing the visual impression of an image and increasing its

information density. The perception of color is formed by the human brain through the analysis of the light flux reaching the retina from objects that emit or reflect light.

Keywords: physical characteristics of luminous flux, power, brightness, illuminance, monochromatic radiation, color depth, or color resolution.

Фізичні характеристики світлового потоку визначаються такими параметрами, як потужність, яскравість та освітленість. Насиченість кольору показує ступінь відмінності певного кольору від монохроматичного («чистого») випромінювання того самого кольорового тону. Ахроматичні кольори – білий, сірий і чорний – характеризуються лише світлотою, тобто рівнем відбиття світла. Білий і чорний кольори відповідають крайнім межах діапазону: чорний – мінімальній інтенсивності, а білий – максимальній. Хроматичні кольори характеризуються трьома параметрами: насиченістю, світлотою та колірним тоном.

Глибина кольору, або колірна роздільна здатність, у комп'ютерній графіці визначає спосіб кодування колірної інформації для її подальшого відображення на екрані монітора: 2 біти використовуються для чорно-білого зображення, а 8, 16 і 24 біти – відповідно для відображення 256, 65536 і понад 16,5 мільйонів відтінків кольору.

Основна частина. Колірна модель – це спосіб представлення кольорів спектра у вигляді набору числових значень певних базових компонентів.

Колірні моделі поділяються на два основні типи: моделі представлення кольору випромінюваного світла та моделі представлення кольору відбитого світла.

У цьому випадку випромінюючим об'єктом виступає екран монітора, а об'єктами, що відбивають світло, є папір, фарба чи пігмент, які самостійно не випромінюють світла, а лише відображають його від сонця або штучного джерела освітлення.

Людське око не може відрізнити певний колір від кольору, отриманого шляхом змішування інших кольорів. Цю особливість люди помітили ще в давнину,

тому замість створення великої кількості окремих фарб різних відтінків традиційно використовують обмежений набір кольорів – від кількох до кількох сотень, а всі інші відтінки отримують шляхом їх змішування. Такі базові кольори називають «первинними» (primary colors) [1].

Людське око здатне розрізняти приблизно до одного мільйона кольорів [1]. Тому створення зображень із надмірно великою кількістю кольорів практично не має сенсу, оскільки для людини вони виглядатимуть однаково.

У зв'язку з цим використовують колірні схеми або моделі (color schemes) – набір первинних кольорів, за допомогою яких утворюються всі інші кольори.

Відповідно до принципів формування зображення адитивним або субтрактивним методами були створені способи подання кольору у вигляді окремих компонентів, які називаються моделями кольору [3].

В адитивних моделях нові кольори утворюються шляхом додавання основних кольорів до чорного. Поєднання всіх базових кольорів із максимальною інтенсивністю створює чистий білий колір, а при нульових значеннях інтенсивності утворюється чорний колір.

У субтрактивних моделях нові кольори формуються шляхом віднімання основних кольорів від білого. У цьому випадку поєднання всіх базових кольорів із максимальною інтенсивністю дає чорний колір, а за нульових значень інтенсивності отримується білий колір.

Найпоширенішими колірними моделями є RGB, CMY, HSB та CIE Lab.

1. Модель RGB (Red-Green-Blue – червоний-зелений-синій). Екран (як і будь-яке інше не випромінююче світлотіло) – спочатку темний. Його початковим кольором є чорний. Інші кольори на ньому одержують шляхом використання комбінації таких трьох кольорів (традиційно в кольорових кінескопах використовуються три «гармати»), які в своїй суміші повинні утворити білий колір. Дослідним шляхом була виведена комбінація «**червоний, зелений, синій**»- **RGB - red/green/blue**, які отримали назву **основні кольори** (рис. 1). Значення

інтенсивності кожного компоненту задається цілим числом від **0 до 255**. За допомогою моделі RGB можна описати близько 16,7 млн кольорів. Чорний колір в схемі відсутній, оскільки ми його і так маємо – це колір «чорного» екрану. Отже відсутність кольору в схемі RGB відповідає чорному кольору.

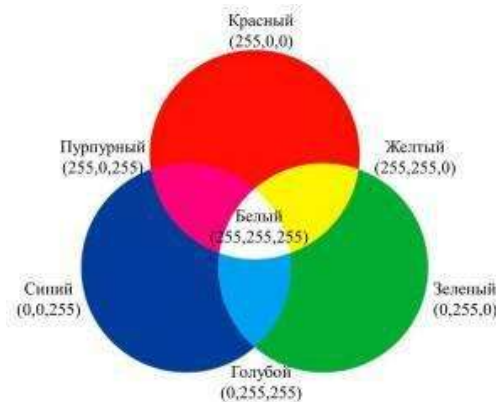


Рис. 1. Графічне представлення моделі RGB

Ця модель застосовується в тих випадках, коли готується комп'ютерне зображення, що призначене для перегляду на екрані монітора або телевізора.

Ця система кольорів називається **адитивною (additive)**, що в перекладі означає «додавальна» або «та, що складається». Її суть полягає в тому, що за основу береться чорний колір, тобто відсутність світла, а потім до нього додаються первинні кольори, які при поєднанні утворюють білий колір.

Якість зображення на екрані визначається кількома факторами [4]: характеристиками монітора, здатністю відтворювати глибокий чорний колір, розміром точок, з яких формується зображення, якістю відеосистеми, що поєднує кольори з трьох базових компонентів, а також умовами навколишнього освітлення – наприклад, у темному приміщенні чи при яскравому сонячному світлі.

Отже, система RGB є адитивною моделлю кольору. Вона базується на поєднанні трьох основних кольорів у різних пропорціях і використовується для електронного відтворення зображень на екранах моніторів. При накладанні компонентів основних кольорів яскравість сумарного випромінювання

збільшується. Поєднання трьох компонентів утворює ахроматичний сірий колір, який зі збільшенням яскравості наближається до білого [1].

2. **Модель CMY (Cyan-Magenta-Yellow – голубий-пурпурний-жовтий).** Папір спочатку має білий колір. Це означає, що він здатний відбивати весь спектр світла, яке на нього потрапляє. Чим якісніший папір, тим краще він відображає всі кольори, і тим білішим він нам здається. Якщо ж папір містить домішки або недостатню кількість білил, він гірше відбиває світло та виглядає сірим.

Протилежним прикладом є асфальт. Новий якісний асфальт без домішок має майже ідеально чорний вигляд, оскільки поглинає практично всі кольори світла, що на нього потрапляють. З часом на його поверхні накопичуються пил, пісок, дрібна галька та інші речовини, які починають відбивати світло. Через це асфальт втрачає насичений чорний колір і стає сірим.

Барвники є речовинами, що поглинають певні кольори світла. Якщо барвник поглинає всі кольори, крім червоного, то при денному освітленні він виглядатиме червоним, оскільки саме цей колір відбивається. Якщо ж освітити такий барвник синім світлом, він здаватиметься чорним, адже синій колір ним поглинається.

Наносячи різні барвники на білий папір, можна зменшувати кількість кольорів, які він відбиває. Наприклад, якщо барвник поглинає всі кольори, окрім синього, то папір буде виглядати синім. Аналогічним способом утворюються й інші кольори.

Відповідно, існують певні комбінації кольорів, змішування яких дозволяє практично повністю поглинути світло, що відбивається папером, і отримати чорний колір. Експериментальним шляхом була визначена комбінація «фуксин-ціан-жовтий» – **CMY (cyan/magenta/yellow)** [1].

В ідеалі, змішуючи ці кольори, ми повинні були б одержати чорний колір. Проте на практиці так не виходить через технічні якості барвника. У кращому випадку, що ми можемо одержати, – це темно-бурий колір, який лише віддалено

нагадує чорний [5]. Більш того вельми безрозсудно було б використовувати всі три дорогі фарби тільки для того, щоб одержати елементарний чорний колір. Тому в тих місцях, де потрібен чорний, замість комбінації трьох фарб наноситься звичний дешевший чорний барвник. І тому до комбінації СМУ звичайно додається буква К (black) – яка означає чорний колір.

Білий колір у цій схемі відсутній, оскільки його роль виконує сам папір. У тих місцях, де необхідно отримати білий колір, фарба просто не наноситься. Таким чином, відсутність фарби в моделі СМУК відповідає білому кольору.

Ця система кольорів називається субтрактивною (subtractive), що означає «віднімальна» або «виключаюча». Її принцип полягає в тому, що за основу береться білий колір, тобто наявність усього спектра кольорів, а шляхом нанесення та змішування фарб із нього поступово «віднімаються» окремі кольори аж до отримання чорного.

Якість друкованого зображення залежить від багатьох факторів: якості паперу, ступеня його білизни, чистоти барвників, точності роботи поліграфічного обладнання, правильності розділення кольорів, а також якості освітлення, особливо якщо використовується штучне джерело світла.

Колірна модель **СМУК** застосовується для комп'ютерних зображень, які надалі планується друкувати на принтері або демонструвати на проекційному екрані у відбитому світлі.

Отже, модель **СМУ** (Cyan-Magenta-Yellow – голубий-пурпурний-жовтий) є субтрактивною моделлю і використовується для створення зображень на білій поверхні. Голубий, пурпурний і жовтий кольори називають доповняльними, оскільки вони доповнюють основні кольори до білого: голубий є доповненням до червоного, пурпурний – до зеленого, а жовтий – до синього. Частка кожного базового компонента в моделі СМУК задається у відсотках – цілими числами від 0 до 100.

Основною проблемою моделі СМУ є те, що накладання доповняльних кольорів на практиці не дозволяє отримати ідеально чистий чорний колір. Саме тому до моделі додають четвертий компонент – чистий чорний колір (blac**K** – чорний). Такий варіант моделі отримав назву **СМУК**.

Перехід з однієї системи в іншу. Головна складність під час переходу з системи RGB у СМУК полягає в тому, що на папері (у моделі СМУК) неможливо відтворити деякі кольори, які легко отримати на екрані [3]. Якщо на моніторі можна задати відтінок із високою точністю, то під час змішування барвників через їхню неідеальну якість досягти такої точності неможливо. Через це зображення, яке на екрані виглядає яскравим і насиченим, при друці може стати бляклим і менш привабливим.

У деяких програмах є можливість заздалегідь перемикатися в режим СМУК і створювати зображення безпосередньо в цій кольоровій моделі.

Адитивний і субтрактивний колір. Телевізори, камери, сканери та монітори комп'ютерів працюють на основі адитивної системи відтворення кольорів (RGB), у якій червоний (R), зелений (G) і синій (B) у поєднанні формують білий колір. Натомість офсетний і цифровий друк, фарби, тканини, пластик і фотографія базуються на субтрактивній системі (СМУ/СМУК), де поєднання ціану (C), пурпурного (M) і жовтого (Y) у результаті дає чорний колір (K).

Зберігання зображень у комп'ютері. Усі цифрові пристрої, що працюють із кольором, зберігають, обробляють і відтворюють зображення за допомогою значень RGB [1]. Для збереження цифрового зображення його спочатку розбивають на сітку пікселів (точок). Кожен піксель вимірюється за вмістом червоного, зеленого та синього компонентів. Далі все зображення записується послідовно, піксель за пікселем.

Для збереження зображення площею 3 квадратні дюйми з роздільною здатністю 150 точок на дюйм потрібно 202 500 пікселів або 607 500 байт інформації.

3. Модель HSB (Hue-Saturation-Brightness – відтінок-насиченість-яскравість). Відповідно до цієї моделі колір визначається трьома компонентами: відтінком (колірним тоном) (**Hue**), насиченістю (**Saturation**) і яскравістю (**Brightness**). При моделюванні кольорів тут не змішуються основні кольори, а змінюються їх властивості.

Графічно модель HSB можна представити у вигляді кільця, уздовж якого розташовуються відтінки кольорів (рис. 2).

На зовнішньому колі знаходяться чисті спектральні кольори або колірні тони. Відтінок H (Hue) – це сам колір у загальноприйнятому розумінні спектральної палітри (рожевий, блакитний, фіолетовий тощо). Кожному відтінку відповідає певне значення кута, яке задається цілим числом у діапазоні від 0 до 360. Мінімальне і максимальне значення відповідає червоному кольору, а проміжні значення – іншим кольорам спектра (червоний – 0°, жовтий – 60°, зелений – 120° тощо).

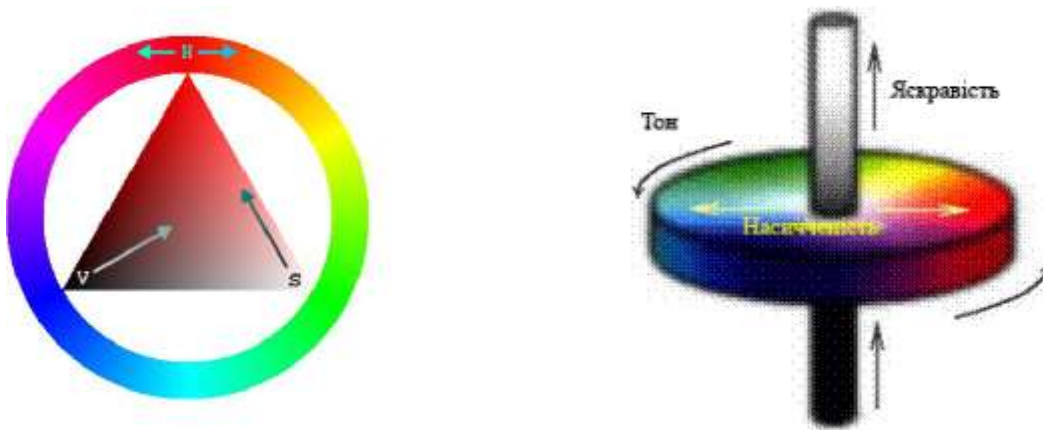


Рис. 2. Графічне представлення моделі HSB

Чим ближче до центра кола розташований колір, тим менша його насиченість і тим більш він блякий або пастельний. Насиченість S (Saturation) визначається кількістю білого у відтінку: у повністю насиченому кольорі білого немає, тому він є «чистим», тоді як частково насичені кольори виглядають світлішими. Значення

насиченості задається у відсотках від 0 до 100. При мінімальній насиченості будь-який колір наближається до сірого або чорного.

Яскравість (Brightness або Value) відображається на осі, перпендикулярній площині колірного кола. Вона визначається домішкою чорного кольору до вибраного відтінку. Значення яскравості також задається у відсотках від 0 до 100. При мінімальній яскравості будь-який відтінок стає чорним. Яскравість визначає інтенсивність світіння: високі значення відповідають яскравим кольорам, а низькі – темним. Всі кольори на зовнішньому колі мають максимальну яскравість.

Модель HSB зазвичай використовується під час створення зображень на комп'ютері з імітацією роботи художніх інструментів. Після завершення роботи зображення зазвичай конвертують в іншу колірну модель залежно від способу подальшого використання або публікації.

Колірна палітра в комп'ютерній графіці за призначенням подібна до палітри художника, однак містить значно більшу кількість кольорів. Електронна палітра складається з певної кількості комірок, у кожній з яких зберігається окремий колірний тон. Конкретна палітра пов'язана з певною моделлю кольору, оскільки її відтінки формуються на основі колірного простору цієї моделі та включають обмежений набір стандартних кольорів. Графічні програми зазвичай пропонують кілька палітр, кожна з яких відповідає певній колірній моделі.

Склад колірних палітр RGB залежить від обраної глибини кольору: 24, 16 або 8 біт. У випадку 8-бітного режиму палітра називається індексною, оскільки коди кольорів у цьому режимі позначають не сам колір пікселя, а його індекс (номер у палітрі). У такому випадку разом із зображенням обов'язково зберігається і сама палітра.

Зображення, які готуються для публікації в Internet, часто створюються у так званій «безпечній» палітрі, що містить 216 кольорів. Це пов'язано з вимогами сумісності між різними комп'ютерними системами та платформами, щоб зображення виглядало однаково на різних пристроях.

4. Модель HSV (Hue-Saturation-Value – відтінок-насиченість-значення кольору). Модель HSV створена Елві Смітом у 1978 році [1]. Її зручно уявляти у вигляді світлової шестигранної піраміди. При цьому по вертикальній осі відкладається значення V , а відстань від осі до бічної грані в горизонтальному перерізі відповідає параметру S (діапазон зміни цих величин – від 0 до 1) (рис. 3).

Шестикутник, що лежить в основі піраміди, є проєкцією колірного куба вздовж його головної діагоналі. Відтінок кольору H задається кутом, який відкладається навколо вертикальної осі, починаючи від червоного кольору. Точки на колі відповідають чистим (максимально насиченим) кольорам. Центральна точка відповідає нейтральному кольору з мінімальною насиченістю (білий, сірий або чорний – залежно від значення яскравості).

Іншими словами, кут визначає відтінок, а довжина вектора – насиченість кольору. Значення S змінюється від 0 на осі піраміди до 1 на її гранях. Значенню $V = 0$ відповідає вершина піраміди (чорний колір), а значенню $V = 1$ – основа піраміди, де кольори мають максимальну інтенсивність. Точка з координатами $V = 1, S = 0$ у центрі основи відповідає білому кольору.

Проміжні значення V при $S = 0$ (на осі піраміди) відповідають відтінкам сірого. Якщо $S = 0$, параметр H вважається невизначеним. Значення $S = 1$ відповідає точкам, що лежать на бічній грані піраміди.

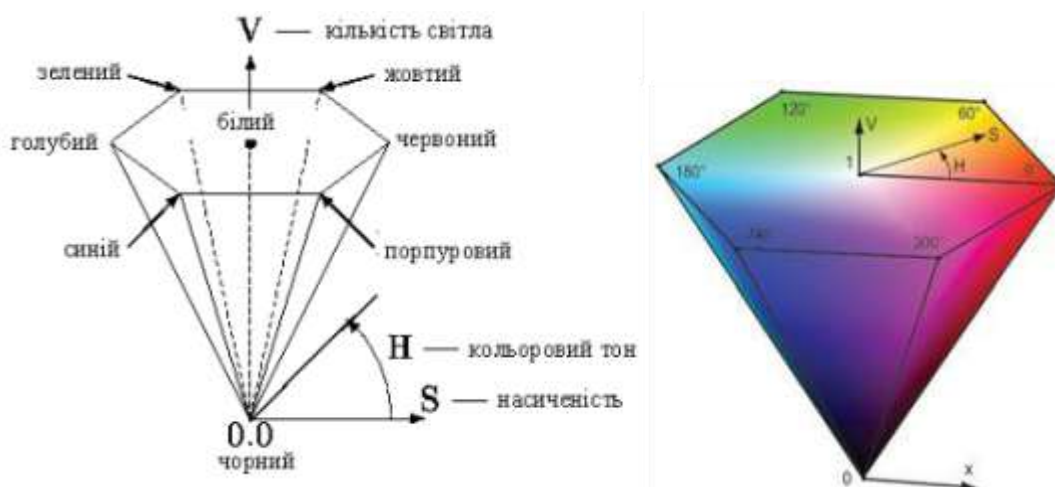


Рис. 3. Графічне представлення моделі HSV

Колірна модель HSV (тон, насиченість, значення кольору) була розроблена з метою забезпечення художника засобами інтуїтивного вибору кольору.

5. Модель HSL (Hue-Saturation- *Lightness* – відтінок-насиченість-освітленість). Розширенням колірної моделі HSV/HSB є HLS. Параметрами якої є Hue, Lightness, Saturation, відповідно: кольоровий тон, кількість світла (освітленість), насиченість. Різниця між моделями HSV/HSB і HLS полягає в заміні нелінійного компонента «яскравість» на лінійний компонент «освітлення».

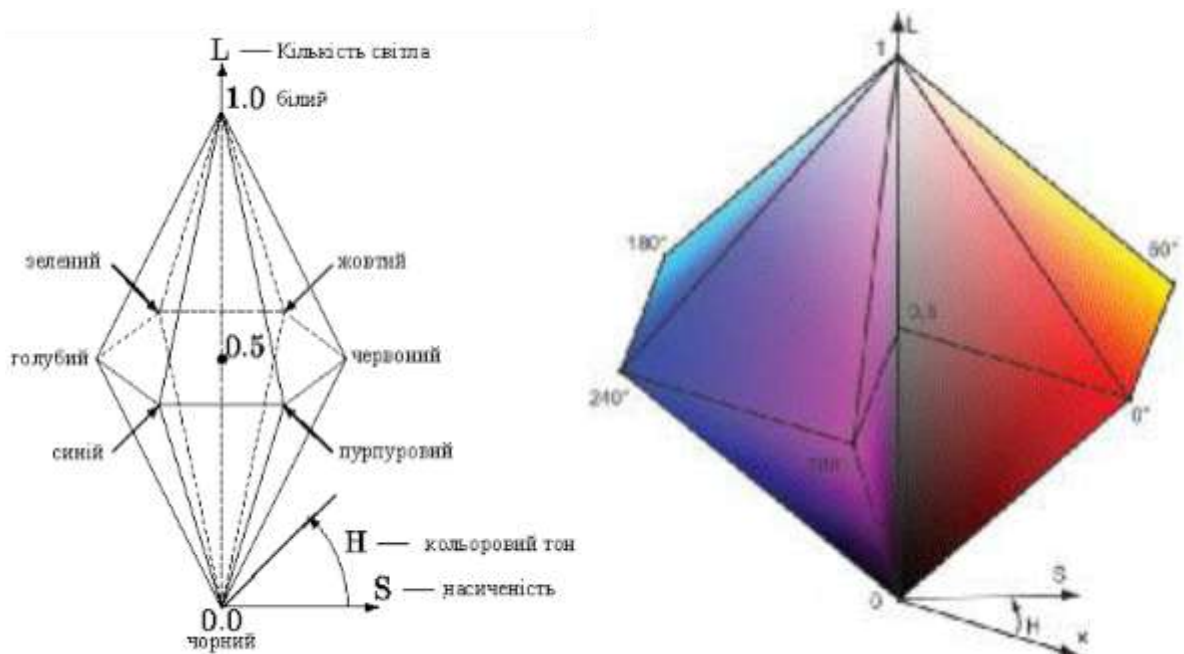


Рис. 4. Графічне представлення моделі HSL

В основі колірної моделі HLS лежить система Освальда. Ця модель утворює колірний простір у формі подвійного конуса (рис. 4). Колірний тон задається кутом повороту навколо вертикальної осі конусів. За початок відліку прийнято синій колір, а далі кольори розташовуються у спектральному порядку та замикаються пурпурним.

По вертикальній осі відкладається параметр L (освітленість), тоді як інші два параметри визначаються аналогічно до моделей HSV/HSB. Простір цієї моделі має

вигляд подвійного конуса, де чорний колір відповідає вершині нижнього конуса і має значення $L=0$, а білий колір максимальної інтенсивності відповідає вершині верхнього конуса і має значення $L=1$.

Найбільш насичені кольорові тони розташовані на рівні основи конуса при $L=0,5$, що є певним недоліком моделі з точки зору практичного використання. Відтінок H , як і в моделях HSV/HSB, задається кутом повороту. Насиченість S змінюється в межах від 0 до 1 і визначається відстанню від вертикальної осі L до бічної поверхні конуса. Таким чином, максимально насичені кольори знаходяться при $L=0,5$ і $S=1$.

Модель HLS добре пристосована для опису кольорів у спосіб, близький до людського сприйняття. Дійсно, людині простіше описувати колір через відтінок, освітленість і насиченість, що й реалізовано в цій моделі. Її важливою перевагою є інтуїтивна зрозумілість і простота використання в алгоритмах обробки зображень, оскільки вона базується на природному способі сприйняття кольору людиною, яка є одночасно розробником і користувачем таких систем.

6. Модель LAB. Модель LAB базується на особливостях людського сприйняття кольору. При однаковій інтенсивності око людини сприймає зелені промені як найбільш яскраві, червоні – дещо менш яскраві, а сині – як найменш яскраві. При цьому яскравість є характеристикою саме сприйняття, а не фізичною властивістю кольору. Під час створення моделі LAB метою було математично врахувати нелінійність людського сприйняття кольорів.

Цій моделі надають перевагу переважно професіонали, оскільки вона поєднує переваги як CMY, так і RGB: забезпечує доступ до всього спектра кольорів і водночас є достатньо ефективною з точки зору обробки. Водночас вона має незвичну структуру порівняно з іншими колірними моделями. Формування кольорів у ній, як і в RGB, базується на поєднанні трьох каналів.

Будь-який колір у моделі LAB задається параметром L (Lightness) – яскравістю, а також двома хроматичними координатами a і b . Параметр a

змінюється від зеленого до червоного через нейтральний сірий, а параметр b – від синього до жовтого через сірий. Параметр L контролює загальну яскравість кольору, утвореного компонентами a і b .

Білий колір відповідає максимальній яскравості. Значення L змінюється в межах від 0 до 100, а значення a і b – у діапазоні від -200 до 200 . Якщо a і b дорівнюють нулю, то при зміні L отримується зображення у відтінках сірого (grayscale).

На відміну від кольірних просторів RGB або CMYK, які фактично є апаратно залежними наборами даних для відтворення кольору на екрані або папері (і можуть змінюватися залежно від типу друкарської машини, якості фарб, вологості повітря чи налаштувань монітора), модель LAB визначає сам колір незалежно від пристрою.

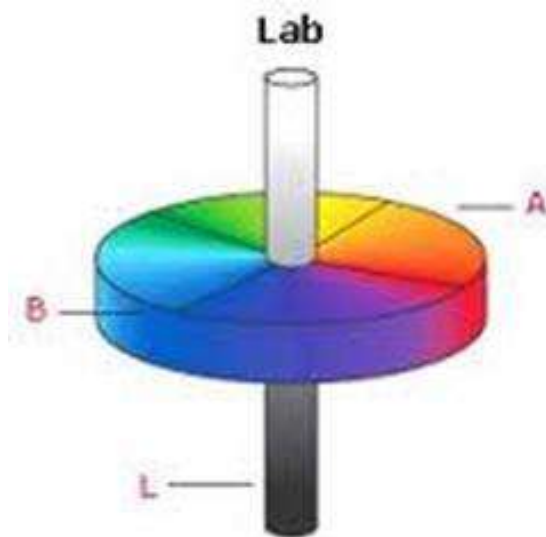


Рис. 5. Графічне представлення моделі LAB

Оскільки в моделі LAB яскравість повністю відокремлена від кольірної інформації, це робить її зручною для корекції тонових характеристик зображення: підвищення контрасту, виправлення тонових спотворень, зменшення кольорового шуму, а також для обробки різких переходів і артефактів, наприклад у JPEG-зображеннях.

Завдяки своїм перевагам, зокрема великому колірному охопленню, модель LAB широко використовується у програмному забезпеченні для обробки зображень. Вона часто застосовується як проміжний простір під час конвертації між різними колірними моделями, наприклад при переході від RGB-даних зі сканера до СМΥК-друку.

7.Модель XYZ. Протягом першої третини XX століття Міжнародна комісія з освітлення проводила дослідження фізіології людського зору, на основі яких у 1931 році була запропонована перцептивна колірна модель, що отримала назву XYZ.

Колірний простір моделі XYZ має вигляд криволінійного конуса з вершиною в початку координат колірної системи. У міру віддалення від цієї вершини яскравість кольорів у відповідних точках, що знаходяться всередині конуса, зростає.

Видима частина колірного простору в моделі XYZ (рис. 6) має форму сегмента неправильної параболи. На її криволінійній межі розташовані спектрально чисті кольори, а на прямолінійній хорді — кольори, отримані змішуванням червоного та пурпурного. При віддаленні від межі цієї фігури насиченість кольору поступово зменшується, і в центральній області знаходиться ахроматична точка.

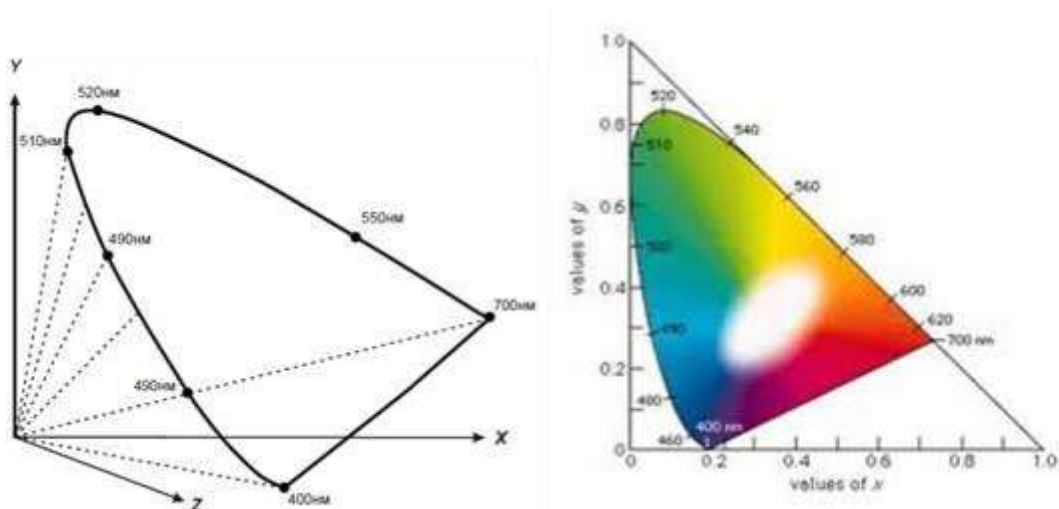


Рис. 6. Графічне представлення моделі XYZ

Висновки. Оскільки об'ємне представлення колірному простору у вигляді складного криволінійного конуса є незручним для практичного використання, у реальних задачах частіше застосовують нормалізовану форму моделі XYZ. У такому варіанті переходять до спрощеного опису кольору. Суть нормалізації полягає в тому, що повний тривимірний опис кольору зводиться до двовимірного подання. Для цього використовують відносні координати x і y , які відображають колірний тон і насиченість, тоді як третя координата z не враховується окремо, оскільки вона визначається через x і y .

Список використаних джерел

1. Biren. F. *New Horizons in Color*. // New York, 1961. - 59 с.
2. Рабкін Є.Б. Поліхроматичні таблиці, Київ, Наука, 2014. 48 с.
3. Alrefo I.F., Rawashdeh M.O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. Vol. 3. P. 72–78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>
4. Alrefo I. F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 4. P. 82-88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
5. Мацулевич О. Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи Technologi CS при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства сільськогосподарського машинобудування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24, т. 1 <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-13>